中国生态农业学报 2016 年 12 月 第 24 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1607−1613



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160180

# 氮肥运筹对麦后直播棉产量与氮素利用的影响*

杨长琴[1] 张国伟[1] 刘瑞显[1**] 倪万潮[1] 张 雷[2] 周关印[2]

(1. 江苏省农业科学院经济作物研究所/农业部长江下游棉花与油菜重点实验室 南京 210014;
2. 中国农业科学院棉花研究所 安阳 455000)

**摘 要** 研究氮肥运筹对麦后直播棉产量和氮素利用效率的影响, 以期制定适宜的氮肥运筹策略。以早熟棉品种'中棉所 50'为试验材料, 采用裂区设计, 研究施氮量[0 kg(N)·hm$^{-2}$、75 kg(N)·hm$^{-2}$、150 kg(N)·hm$^{-2}$、225 kg(N)·hm$^{-2}$和 300 kg(N)·hm$^{-2}$]和施用次数(1 次和 2 次)对麦后直播棉生物量、产量及氮素利用率的影响。结果表明: 施氮量为 0~150 kg(N)·hm$^{-2}$时, 皮棉产量随施氮量增加而显著增加; 施氮量 150 kg(N)·hm$^{-2}$以上时, 皮棉产量增加不显著; 两次施肥皮棉产量显著高于一次施肥。施氮量与施用次数互作显著, 施氮量 150 kg(N)·hm$^{-2}$、分两次施用时, 皮棉产量达到较高水平。生物量、氮素累积量随施氮量、施用次数增加呈增加趋势, 但生殖器官氮素分配系数呈相反变化。氮素表观利用率(NARE)、氮素农学利用率(NAE)及氮素生产效率(NPE)在施氮量 75 kg(N)·hm$^{-2}$以上时随施氮量增加而降低; NARE 和 NAE 随施用次数增加而增加, NPE 则反之。施氮量和施氮次数互作分析显示, NARE 和 NAE 以氮肥 2 次施用而 NPE 以 1 次施用、施氮量为 75~150 kg(N)·hm$^{-2}$时较高。相关性分析表明, 生物量、皮棉产量与氮素累积量呈显著正相关, 与氮素分配系数相关性不显著; 皮棉产量与氮素利用率相关性均不显著。综上, 本试验条件下, 麦后直播棉施氮量为 150 kg(N)·hm$^{-2}$且分两次施用, 可以获得较高的产量并有利于提高氮素利用率。

**关键词** 麦后直播棉 施氮量 施氮次数 皮棉产量 生物量 氮素利用率
**中图分类号:** S143.1; S1472.2; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)12-1607-07

# Effect of nitrogen management on lint yield and nitrogen utilization of field-seeded cotton after barley harvest*

YANG Changqin[1], ZHANG Guowei[1], LIU Ruixian[1**], NI Wanchao[1], ZHANG Lei[2], ZHOU Guanyin[2]

(1. Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / The Key Laboratory of Cotton and Rape in Yangtze River Downstream of Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China)

**Abstract** The traditional cotton transplanting technique was adopted as an intercropped planting system to improve comprehensive harvest gains in limited acreage fields. However, this method was not suitable for current cotton production because of self-evident production barriers such as intensive labor requirement and overuse of nitrogen fertilizers. The new cotton planting system (field-seeding after barley harvest) without transplanting is more economical in terms of labor input, and therefore more convenient for mechanized cotton production. It is the now prospective direction of cotton production in Yangtze River Valley. To optimize the cultivation strategy of this new cotton cultivation system, the adoption of short-season cotton varieties and simplification of nitrogen application are the key techniques under consideration for the effect of the shortened growth duration of cotton after barley harvest. The objective of the study was to explore the effect of different

* 江苏省三新工程(SXGC[2014]299)、江苏省科技支撑计划项目(BE2014389)和国家科技支撑计划项目(2014BAD11B02)资助
** 通讯作者: 刘瑞显, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: liuruixian2008@163.com
杨长琴, 主要从事作物栽培生理研究。E-mail: ychq2003@qq.com
收稿日期: 2016−02−26 接受日期: 2016−04−27

* Founded by the Jiangsu Province Three-new Agriculture Innovation Project (SXGC[2014]299), the Science and Technology Support Program of Jiangsu Province (BE2014389) and the National Key Technology R&D Program of China (2014BAD11B02)
** Corresponding author, E-mail: liuruixian2008@163.com
Received Feb. 26, 2016; accepted Apr. 27, 2016

nitrogen management schemes on yield, biomass and nitrogen use efficiency of short-season cotton variety (cv. CCRI 50) sowed after barley harvest, and to recommend the appropriate nitrogen management scheme under the cultivation system. A field experiment was conducted in 2013 and 2014 at the experimental station of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences in Nanjing, Jiangsu Province, China. A split-plot design with three replicates was adopted where the main plot factor was nitrogen application rate and the sub-plot factor was application frequency. There were 5 levels of nitrogen application rate [0 kg(N)·hm$^{-2}$, 75 kg(N)·hm$^{-2}$, 150 kg(N)·hm$^{-2}$, 225 kg(N)·hm$^{-2}$ and 300 kg(N)·hm$^{-2}$] and 2 levels of application frequency (1 or 2 times). Biomass and yields, nitrogen use efficiency of cotton were investigated. The results showed that cotton lint yield significantly increased following an increase in nitrogen rate from 0 to 150 kg(N)·hm$^{-2}$. The cotton lint yield in 2 times fertilizer application treatment was higher than that of one time fertilizer application. The interactive effect of nitrogen rate and application frequency showed that the cotton lint yield was highest under 150 kg (N)·hm$^{-2}$ nitrogen rate and 2 times application of fertilizer condition. Biomass and nitrogen accumulation also increased with increasing nitrogen rate and application frequency, while reproductive organ distribution ratio decreased. When nitrogen rate exceeded 75 kg(N)·hm$^{-2}$, apparent nitrogen recovery efficiency (ANRE), agronomic nitrogen efficiency (ANE) and nitrogen production efficiency (NPE) decreased with increasing nitrogen application rate. ANRE and ANE in the 2 times application treatment were higher than those in the one time nitrogen application treatment, but NPE showed the opposite trend. The interactive effects of nitrogen rate and application frequency showed that under 75–150 kg(N)·hm$^{-2}$ nitrogen application condition, ANRE and ANE with 2 times nitrogen application, while NPE with one time application were higher than others treatments. Correlation analysis showed that lint yields and biomass significantly correlated with nitrogen accumulation, but did not correlate with nitrogen distribution coefficient. Nitrogen utilization rate did not correlate with cotton lint yield. As a result, the optimum nitrogen management was 150 kg(N)·hm$^{-2}$ with 2 times application for cotton under field-seeding after barley harvest.

**Keywords** Field-seeded cotton after barley harvest; Nitrogen management; Nitrogen application frequency; Lint yield; Biomass accumulation; Nitrogen use efficiency



施氮是调控作物生长发育和产量形成的重要措施，传统作物生产中以高氮肥投入来获得高产[1−2]。然而，相关研究已表明氮肥的过量投入并不利于实现高产，并且导致氮肥利用效率低下，造成资源浪费和环境污染[2−5]。此外，棉田传统的施肥方式全生育期施肥次数多，增加了棉田用工，降低收益，不利于棉田高效发展。因此，研究基于保护环境的棉田合理氮肥减量、简化运筹技术具有重要的意义。

麦棉两熟是长江流域下游棉区主要的种植制度。与传统的育苗移栽棉相比，麦后直播棉具有省工节本且利于机械化生产等特点，已成为长江流域棉区棉花生产发展的方向[6−7]。麦后直播棉有效生育期短，品种宜采用早熟常规棉，高产栽培技术以促进棉花(*Anemone vitifolia* Buch.)早发、集中开花和快速成铃为核心，因此，不能沿用传统育苗移栽棉的氮肥运筹技术[8]。已有的研究表明，不同基因型棉花、不同生态条件下，适宜的施氮量差异较大[9−10]；且运筹方式亦显著影响棉花的产量与肥料利用率[3,11]。有关长江流域下游棉区麦后直播棉施氮量报道较少。张国伟等[8]研究表明，秸秆还田条件下麦后直播棉的推荐施氮量为 150~180 kg(N)·hm$^{-2}$，大幅度低于育苗移栽棉。但有关露地直播条件下，麦后直播棉适宜的氮肥运筹技术却少见报道。

本文基于长江流域下游棉区气候生态条件和麦后直播棉生育特性，以早熟棉‘中棉所50’为材料，研究氮肥运筹对麦后直播棉产量和氮素利用率的影响，以期为制定该棉区麦后直播棉田合理的养分管理技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2013 年和 2014 年在江苏省南京市(118°50′E, 32°02′N)江苏省农业科学院试验站进行。供试土壤为黏质土，2 年试验测定的 0~20 cm 土壤 pH 分别为 6.0 和 5.9，含有机质 12.8 g·kg$^{-1}$和 13.1 g·kg$^{-1}$，全氮 1.01 g·kg$^{-1}$和 1.08 g·kg$^{-1}$，速效氮 21.5 mg·kg$^{-1}$和 20.8 mg·kg$^{-1}$，速效磷 36.8 mg·kg$^{-1}$和 36.1 mg·kg$^{-1}$，速效钾 152.5 mg·kg$^{-1}$和 153.1 mg·kg$^{-1}$。

试验以早熟棉品种‘中棉所 50’为材料，设施氮量和氮肥施用次数 2 个试验因子。采用裂区试验设计，主区因素为施氮量，副区因素为施用次数。施氮量设 0 kg(N)·hm$^{-2}$($N_0$)、75 kg(N)·hm$^{-2}$($N_1$)、150 kg(N)·hm$^{-2}$($N_2$)、225 kg(N)·hm$^{-2}$($N_3$)和 300 kg(N)·hm$^{-2}$($N_4$)5 个水平；施用次数设一次施肥($T_1$)和两次施肥($T_2$)2 个水平。$T_1$ 于出苗 1 周后全部施入；$T_2$ 分别于出苗 1 周后和初花时两次施入，用量比例为 4∶6。试验有 9 个处理组合，3 次重复，共 27 个小区，小区面积 28 m$^2$ (4 m×7 m)。两年均于 5 月 25 日大麦(*Hordeum vulgare* L.)收获后直播，种植密度 7.5×10$^4$ 株·hm$^{-2}$，行距 76 cm，等行距种植。磷肥与钾肥施用量为: $P_2O_5$ 112.5 kg·hm$^{-2}$、

$K_2O$ 225 kg·hm$^{-2}$，苗肥与花铃肥各 50%。其他田间管理措施按一般大田进行。

### 1.2　测定内容与方法

#### 1.2.1　生物量、养分累积与分配

于初花期、盛花期及吐絮期分别取代表性棉株 5 株，3 次重复，按根、茎枝、叶、蕾铃等器官分开，在 105 ℃杀青 30 min 后，80 ℃烘至恒重，称生物量。并计算生殖器官生物量分配系数。吐絮期植株样粉碎后用凯氏定氮法测定全氮含量，再根据不同器官的生物量计算棉花氮素累积量与生殖器官氮素分配系数。

生殖器官生物量分配系数(%)=生殖器官生物量×100/总生物量　(1)

生殖器官氮素分配系数(%)=生殖器官氮素累积量×100/总氮素累积量　(2)

#### 1.2.2　产量

吐絮期每小区调查连续 20 株棉花成铃数，并收正常吐絮铃 30 个，测定铃重、衣分，计算产量。

### 1.3　氮素利用率[12]

氮素表观利用率(NARE，%)=(施氮区棉株吸氮量–不施氮区棉株吸氮量)×100/氮肥用量　(3)

氮素农学利用率(NAE，kg·kg$^{-1}$)=(施氮区皮棉产量–不施氮区皮棉产量)/氮肥用量　(4)

氮素生产效率(NPE，kg·kg$^{-1}$)=单位面积皮棉产量/成熟期单位面积棉株吸氮量　(5)

### 1.4　统计分析方法

采用Microsoft Excel软件处理数据和作图，用SPSS 11.0软件分析进行统计分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　氮肥运筹对麦后直播棉产量及其构成的影响

由表 1 可见，施氮量显著影响皮棉产量和产量构成。2013 年皮棉产量随施氮量增加而增加，但 $N_3$ 和 $N_4$ 处理间差异不显著。产量构成中，铃数表现与皮棉产量相似；铃重以 $N_0$ 和 $N_1$ 水平下较低；衣分总体表现为随施氮量增加而降低的趋势。2014 年皮棉产量以 $N_4$ 和 $N_2$ 处理较高；产量构成因子变化趋势与 2013 年相似。两年氮肥施用次数均显著影响皮棉产量、铃数和衣分，而对铃重无显著影响，皮棉产量和铃数以 $T_2$ 处理显著高于 $T_1$，衣分以 $T_1$ 高于 $T_2$。此外，施氮量与施用次数对皮棉产量、铃数和铃重存在显著互作效应，两年均以 $N_2T_2$ 和 $N_4T_2$ 处理皮棉产量较高；铃数以 $N_2T_2$、$N_3T_2$ 和 $N_4T_2$ 处理较高，铃重以 $N_2T_2$、$N_3T_1$、$N_4T_1$ 和 $N_4T_2$ 处理较高。

**表 1　2013 年和 2014 年氮肥运筹对麦后直播棉产量及其构成的影响**

Table 1　Effect of nitrogen management on lint yield and yield components of cotton under field-seeding after barley harvest in 2013 and 2014

| 施氮量 Nitrogen rate | 施氮次数 Nitrogen application frequency | 2013 | | | | 2014 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 铃数 Bolls number per hectare ($10^4$·hm$^{-2}$) | 铃重 Boll weight (g) | 衣分 Lint percent (%) | 皮棉产量 Lint yield (kg·hm$^{-2}$) | 铃数 Bolls number per hectare ($10^4$·hm$^{-2}$) | 铃重 Boll weight (g) | 衣分 Lint percent (%) | 皮棉产量 Lint yield (kg·hm$^{-2}$) |
| $N_0$ | | 56.3±1.4f | 4.6±0.2bcd | 41.5±0.2ab | 1 070.9±31.6g | 41.6±1.5f | 4.6±0.1c | 41.7±0.8a | 799.3±43.1g |
| $N_1$ | $T_1$ | 76.5±5.3e | 4.3±0.2e | 41.7±0.2a | 1 381.6±137.2f | 61.0±1.5e | 4.5±0.2c | 42.0±0.3a | 1 156.4±81.3f |
| | $T_2$ | 99.2±2.0c | 4.5±0.1de | 41.5±0.3ab | 1 837.9±7.1d | 64.4±0.8d | 5.0±0.1b | 41.7±0.2a | 1 344.8±20.2e |
| $N_2$ | $T_1$ | 87.9±2.6d | 4.5±0.1cd | 41.4±0.3ab | 1 639.9±79.7e | 65.0±1.2cd | 5.1±0.2b | 41.7±0.2a | 1 370.1±65.8de |
| | $T_2$ | 110.2±1.2a | 4.7±0.1ab | 40.9±0.3bcd | 2 130.4±54.2a | 74.4±0.9a | 5.3±0.0ab | 41.3±0.3ab | 1 614.0±33.8a |
| $N_3$ | $T_1$ | 99.2±1.3c | 4.8±0.1a | 41.0±0.1bc | 1 956.3±34.4c | 67.4±1.7bc | 5.1±0.1ab | 41.2±0.4abc | 1 428.0±82.9cd |
| | $T_2$ | 112.1±1.8a | 4.6±0.2bcd | 40.3±0.2d | 2 063.3±98.5ab | 72.6±1.1a | 5.1±0.0b | 40.4±0.1c | 1 483.5±25.6bc |
| $N_4$ | $T_1$ | 104.7±3.3b | 4.7±0.1ab | 40.7±0.3cd | 1 999.0±57.6bc | 68.8±1.6b | 5.4±0.2a | 40.7±0.6bc | 1 506.5±50.6b |
| | $T_2$ | 112.1±1.7a | 4.7±0.1abc | 40.5±0.2cd | 2 119.2±82.9a | 72.2±1.5a | 5.2±0.0ab | 40.3±0.3c | 1 517.5±10.5b |
| 变异来源 Source of variation | | | | | | | | | |
| N | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| T | | ** | ns | * | ** | ** | ns | * | ** |
| N × T | | ** | ** | ns | ** | ** | ** | ns | * |

$N_0$：施氮量为 0 kg(N)·hm$^{-2}$；$N_1$：施氮量为 75 kg(N)·hm$^{-2}$；$N_2$：施氮量为 150 kg(N)·hm$^{-2}$；$N_3$：施氮量为 225 kg(N)·hm$^{-2}$；$N_4$：施氮量为 300 kg(N)·hm$^{-2}$。$T_1$：一次施肥；$T_2$：两次施肥。数据为 3 次重复的平均值±标准误，数值后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著；*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著；ns 表示差异不显著($P>0.05$)。$N_0$: nitrogen rate of 0 kg(N)·hm$^{-2}$; $N_1$: nitrogen rate of 75 kg(N)·hm$^{-2}$; $N_2$: nitrogen rate of 150 kg(N)·hm$^{-2}$; $N_3$: nitrogen rate of 225 kg(N)·hm$^{-2}$; $N_4$: nitrogen rate of 300 kg(N)·hm$^{-2}$. $T_1$: one nitrogen application; $T_2$: two nitrogen applications. Values are means ± S.E. ($n$ = 3). Different letters mean significant difference ($P$ < 0.05) among different nitrogen rates and application times. * and ** mean significant differences at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. ns means no significant difference ($P$ > 0.05). The same below.

### 2.2 氮肥运筹对麦后直播棉生物量累积和分配的影响

表 2 可见，施氮量和施用次数显著影响麦后直播棉群体生物量。各生育期生物量随施氮量增加而增加；初花期生物量以 $T_1$ 高于 $T_2$，盛铃期和吐絮期则相反。生殖器官生物量分配系数随施氮量增加呈降低趋势，随施用次数增加而增加。施氮量和施用次数对生物量和生殖器官生物量分配系数存在显著互作效应，吐絮期生物量以 $N_4T_2$ 处理较高、生殖器官生物量分配系数以 $N_0$ 处理最高，两年试验趋势一致。

**表 2 2013 年和 2014 年氮肥运筹对麦后直播棉花不同生育期生物量累积及生殖器官生物量分配系数的影响**

Table 2 Effect of nitrogen management on biomass accumulation and biomass distribution ratio of reproductive organs of cotton under field-seeding after barley harvest in 2013 and 2014

| 施氮量 Nitrogen rate | 施氮次数 Nitrogen application frequency | 2013 生物量 Biomass 初花期 Initial bloom stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2013 生物量 Biomass 盛铃期 Peak bolling stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2013 生物量 Biomass 吐絮期 Boll-opening stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2013 BDRO (%) | 2014 生物量 Biomass 初花期 Initial bloom stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2014 生物量 Biomass 盛铃期 Peak bolling stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2014 生物量 Biomass 吐絮期 Boll-opening stage ($kg\cdot hm^{-2}$) | 2014 BDRO (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_0$ | | 587.8±25.7e | 2 877.7±64.4g | 4 258.5±3.7g | 66.5±2.1a | 1 635.2±62.3d | 3 966.7±89.1e | 4 434.4±100.2h | 58.1±1.1a |
| $N_1$ | $T_1$ | 940.5±37.3d | 3 855.3±61.2f | 5 405.4±142.9f | 60.2±1.1b | 2 279.6±132.6b | 5 608.1±85.9d | 5 688.6±140.1g | 54.3±0.1b |
| | $T_2$ | 725.2±47.7d | 4 677.7±63.1e | 6 931.9±49.3e | 61.8±0.0b | 1 981.9±70.0c | 5 680.1±277.8d | 6 299.3±59.3f | 55.6±0.8b |
| $N_2$ | $T_1$ | 1 042.6±40.6b | 5 989.6±1.2d | 6 810.4±75.8e | 56.2±1.4c | 2 478.2±5.6ab | 6 488.8±267.0c | 6 731.3±109.8e | 51.3±0.2c |
| | $T_2$ | 1 032.8±0.4b | 7 153.7±66.4b | 8 455.2±19.6d | 60.4±0.6b | 2 296.5±46.7b | 6 758.4±224.6c | 7 776.4±137.9d | 54.2±0.8b |
| $N_3$ | $T_1$ | 1 224.5±55.9a | 6 231.0±30.2cd | 8 518.2±6.3d | 55.4±0.4c | 2 634.4±59.4a | 6 377.2±338.3c | 8 124.5±41.1cd | 48.1±1.2e |
| | $T_2$ | 938.2±14.3c | 7 432.4±6.8a | 9 450.9±73.5c | 55.8±0.6c | 2 476.9±57.8ab | 7 470.4±100.2ab | 8 732.6±373.9b | 52.0±0.3c |
| $N_4$ | $T_1$ | 1 202.0±18.3a | 6 405.6±19.7c | 9 668.4±63.9b | 49.5±1.3d | 2 607.9±40.6a | 6 965.6±65.7bc | 8 329.1±169.7bc | 47.0±0.9e |
| | $T_2$ | 1 038.3±4.2b | 7 494.0±17.5a | 10 431.3±88.0a | 53.5±0.3c | 2 412.7±106.6ab | 7 925.4±216.6a | 9 216.4±223.8a | 49.6±0.3d |
| 变异来源 Source of variation | | | | | | | | | |
| N | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| T | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| N × T | | * | ** | ** | * | ** | * | * | * |

BDRO: 生殖器官生物量分配系数。下同。BDRO: biomass distribution ratio of reproductive organs. The same below.

### 2.3 氮肥运筹对麦后直播棉氮素累积和利用的影响

由表 3 可见，施氮量和施用次数对氮素累积量和生殖器官氮素分配系数有显著影响。氮素累积量随施氮量和施用次数增加而显著增加。生殖器官氮素分配系数在施氮量 $N_0$~$N_2$(2013 年)和 $N_0$~$N_1$(2014 年)处理间无显著差异，其后随施氮量增加而显著降低；生殖器官氮素分配系数随施用次数的增加而显著增加。施氮量和施用次数对氮素累积量和生殖器官氮素分配系数存在显著互作效应，氮素累积量均以 $N_4F_2$ 最高；生殖器官氮素分配系数 2013 年以 $N_1T_2$ 和 $N_2T_2$ 最高、2014 年以 $N_1T_2$ 最高。

氮素表观利用率(NARE)和氮素农学利用率(NAE)随施氮量增加而降低，随施肥次数增加显著增加。氮素生产效率(NPE)在施氮量 $N_1$ 时较高，其后随施氮量增加而降低，随氮肥施用次数的增加而降低。施氮量和施用次数对氮素生产效率的互作效应表明，两年 NARE 和 NAE 均以 $N_1T_2$ 最高，其次是 $N_2T_2$；2013 年 NPE 以 $N_1T_1$ 和 $N_2T_1$ 较高，2014 年以 $N_1T_1$ 和 $N_1T_2$ 较高。

### 2.4 生物量和产量与氮素累积、利用的关系

麦后直播棉生物量和产量与氮素累积量呈极显著正相关，与生殖器官氮素分配系数相关不显著(表 4)。表明产量与生物量形成是以氮素累积量为基础的，与生殖器官氮素分配系数相关性较小。生殖器官生物量分配系数与氮素累积量呈显著负相关，与生殖器官氮素分配系数呈极显著正相关。氮素累积不利于生殖器官生物量分配系数提高且氮素分配和生物量分配一致。生物量与 NARE、NAE 相关不显著，与 NPE 呈显著负相关，即生物量高则不利于 NPE 提高；生殖器官生物量分配系数与 NARE、NAE 和 NPE 呈极显著正相关，表明高的生殖器官生物量分配系数有利于提高氮素利用率。产量与氮素利用率相关均不显著，表明高的氮素利用率与获得高产存在不一致性。

## 3 讨论

### 3.1 氮肥运筹对麦后直播棉花产量和生物量的影响

合理施氮是调控作物产量的重要措施。一般认为，棉花产量在低氮水平下随施氮量的增加而增加，

**表 3　2013 年和 2014 年氮肥运筹对麦后直播棉花氮素利用率的影响**

Table 3　Effect of nitrogen management on nitrogen use efficiency of cotton under field-seeding after barley harvest in 2013 and 2014

| 施氮量 Nitrogen rate | 施氮次数 Nitrogen application frequency | 2013 | | | | | 2014 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NAR ($kg\cdot hm^{-2}$) | NDRO (%) | 氮素利用率 Nitrogen use efficiency | | | NAR ($kg\cdot hm^{-2}$) | NDRO (%) | 氮素利用率 Nitrogen use efficiency | | |
| | | | | NARE (%) | NAE ($kg\cdot kg^{-1}$) | NPE ($kg\cdot kg^{-1}$) | | | NARE (%) | NAE ($kg\cdot kg^{-1}$) | NPE ($kg\cdot kg^{-1}$) |
| $N_0$ | | 95.3±1.0h | 61.1±1.3b | | | 11.3±0.3b | 92.6±3.8h | 51.8±0.0b | | | 8.6±0.4b |
| $N_1$ | $T_1$ | 120.2±2.8g | 60.7±0.7b | 33.1±2.4f | 5.1±0.9c | 12.2±0.5a | 120.6±2.5g | 51.6±0.3b | 37.4±1.7de | 4.8±0.5b | 9.5±0.2a |
| | $T_2$ | 172.6±1.3e | 65.7±0.1a | 97.6±3.1a | 10.1±0.5a | 10.9±0.1bc | 140.1±2.1f | 53.5±0.5a | 63.3±2.3a | 7.3±0.7a | 9.6±0.1a |
| $N_2$ | $T_1$ | 144.8±2.1f | 59.1±1.2bc | 33.0±0.7f | 3.8±0.4cd | 11.4±0.6ab | 152.7±3.0e | 49.1±0.0c | 40.1±0.5cd | 3.8±0.5c | 8.9±0.2b |
| | $T_2$ | 209.9±0.0c | 64.0±0.6a | 76.3±0.7b | 7.1±0.2b | 10.2±0.3c | 183.9±1.6d | 51.9±0.9b | 60.9±3.6a | 5.4±0.1b | 8.7±0.1b |
| $N_3$ | $T_1$ | 188.8±0.2d | 56.5±0.6cd | 39.1±0.4e | 4.0±0.1cd | 10.8±0.1bc | 191.5±0.4cd | 46.9±0.6d | 44.0±1.5c | 2.8±0.3d | 7.4±0.0c |
| | $T_2$ | 207.8±2.5c | 55.9±0.4d | 61.3±1.6c | 4.6±0.2cd | 9.1±0.4d | 203.4±8.2b | 49.3±0.2c | 49.2±2.0b | 3.0±0.1d | 7.3±0.3c |
| $N_4$ | $T_1$ | 239.0±1.9b | 46.4±1.2f | 43.8±1.0d | 3.2±0.2d | 9.0±0.1d | 196.9±1.8bc | 45.2±0.7e | 34.8±0.7e | 2.4±0.1d | 7.6±0.1c |
| | $T_2$ | 249.3±1.8a | 50.7±0.1e | 58.8±0.2c | 3.5±0.2d | 7.9±0.4e | 219.8±5.1a | 48.5±0.3c | 42.4±0.4cd | 2.4±0.1d | 6.9±0.2d |
| 变异来源 Source of variation | | | | | | | | | | | |
| N | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| T | | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| N × T | | ** | ** | ** | ** | * | ** | * | ** | ** | ** |

NAR: 氮累积量; NDRO: 生殖器官氮素分配系数; NARE: 氮素表观利用率; NAE: 氮素农学利用率; NPE: 氮素生产效率。下同。NAR: nitrogen accumulation rate; NDRO: nitrogen distribution ratio of reproductive organs; NARE: nitrogen apparent recovery efficiency; NAE: nitrogen agronomic efficiency; NPE: nitrogen production efficiency. The same below.

**表 4　麦后直播棉花生物量、产量与氮素累积、利用的关系**

Table 4　Correlations among nitrogen utilization, biomass and yield of cotton under field-seeding after barley harvest

| | NAR | NDRO | NARE | NAE | NPE |
|---|---|---|---|---|---|
| 生物量 Biomass | 0.986** | –0.365 | 0.126 | –0.421 | –0.537* |
| BDRO | –0.522* | 0.899** | 0.544** | 0.793** | 0.777** |
| 产量 Lint yield | 0.823** | 0.163 | 0.461 | 0.153 | 0.011 |

达到一定的施氮量后产量不再增加[13]; 且施氮量过大, 产量有下降趋势[14–16]。本研究中, 麦后直播早熟棉施氮量 150~300 kg(N)·hm$^{-2}$(2013 年)和 150 kg(N)·hm$^{-2}$(2014 年)、两次施肥下, 皮棉产量即达到较高水平, 与本试验条件下土壤地力较好有关。生产中传统的育苗移栽棉施氮量达到 337.5 kg(N)·hm$^{-2}$ 以上, 分 4~5 次施用[2,17]。与传统施肥技术相比, 施氮量降低 50%、施肥次数减少 2~3 次[2], 利于作物生产节本增效和农田生态环境保护。

生物量累积是作物产量形成的基础。王子胜等[18]研究表明, 过量施氮和氮肥不足均影响生物量。本试验中, 棉花生物量随施氮量增加而增加, 但生殖器官生物量分配系数呈相反趋势。以施氮量 0~75 kg(N)·hm$^{-2}$ 处理生殖器官生物量分配系数较高, 可能低氮条件下营养生长受抑制, 光合产物优先分配给能保持较强库力的器官[19]。生殖器官生物量分配系数随施氮量增加而降低, 这表明施氮量增加以促进营养体建成为主, 因此, 过量施氮易造成棉花生育后期营养生长与生殖生长失调。氮肥施用次数也显著影响生物量。初花期生物量以一次施肥高于两次施肥, 其后生物量及生殖器官生物量分配系数均以两次施肥较高。表明苗期一次施肥促进了初花期前营养体的快速建成, 而两次施用的最终生物累积量高, 且营养和生殖生长协调。

### 3.2　氮肥运筹对氮素累积和利用的影响

生物量的累积是以养分吸收为基础的, 本试验中氮肥运筹对麦后直播棉氮素累积和分配与生物量基本同步[20]。本试验中施氮量 75 kg(N)·hm$^{-2}$ 以上时, 氮素利用率随施氮量增加而降低, 表明施氮量过高不利于提高氮素利用率。与一次施肥相比, 两次施肥氮素表观利用率和农学利用率增加。表明氮肥两次施用更有利于氮素累积及产量增加。施氮量与施用次数互作显示, 以施氮量 75~150 kg(N)·hm$^{-2}$、两次施用处理氮素利用率较高。

### 3.3　生物量和产量与氮素累积、利用的关系

相关分析表明, 氮素累积是生物量、产量形成的基础[18,21]。本试验中, 施氮量为 75 kg(N)·hm$^{-2}$ 时, 氮素累积量大幅度低于其他施肥处理, 生物量和产量也

显著降低。而过高施氮量下，如施氮量 300 kg(N)·hm$^{-2}$ 处理，氮素累积量、生物量显著高于施氮量 150 kg(N)·hm$^{-2}$ 处理，但产量差异不显著，这可能与过量施用氮肥影响熟性有关[22–23]。可见，施氮量过低、过高均不利于产量形成。本试验条件下，施氮量 150 kg(N)·hm$^{-2}$ 以上，不仅皮棉产量不再增加，氮素利用率也降低。进一步分析发现，氮素利用率与产量相关不显著，表明存在适宜的氮肥运筹方式，在获得较高产量的同时兼顾提高氮素利用率。

## 4 结论

氮肥运筹影响氮素累积和分配，从而影响生物量和产量。氮肥两次施用条件下，施氮量 150 kg(N)·hm$^{-2}$ 以上时，皮棉产量增加不显著；施氮量为 75~150 kg(N)·hm$^{-2}$ 时氮肥利用率较高，其后随施氮量增加而降低，如施氮量为 150 kg(N)·hm$^{-2}$ 的氮肥表观利用率和农学利用率比 300 kg(N)·hm$^{-2}$ 时分别高 17.5%、3.6 kg·kg$^{-1}$(2013 年)和 18.5%、3.0 kg·kg$^{-1}$(2014 年)。本试验条件下，施氮量为 150 kg(N)·hm$^{-2}$、分苗肥和花铃肥两次施用，是麦后直播早熟棉最佳氮肥运筹方式。

**致谢** 感谢江苏省现代作物生产协同创新中心对本研究的支持!

## 参考文献 References

[1] 李强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 17–26
Li Q, Ma X J, Cheng Q B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on post-silking dry matter production and leaves function characteristics of low-nitrogen tolerance maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 17–26

[2] 张常赫, 戴艳娇, 杨洪坤, 等. 不同栽培方式对长江下游棉田资源利用效率的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(7): 1105–1111
Zhang C H, Dai Y J, Yang H K, et al. Effects of different cultivation patterns on cotton field resources use efficiency in Yangtze River Valley[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(7): 1105–1111

[3] Yang G Z, Tang H Y, Nie Y C, et al. Responses of cotton growth, yield, and biomass to nitrogen split application ratio[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(3): 164–170

[4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041–3046

[5] 段然, 汤月丰, 文炯, 等. 减量施肥对湖垸旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 536–543
Duan R, Tang Y F, Wen J, et al. Effect of reducing fertilizer application on crop yield and nitrogen and phosphorus loss in runoff from embankment upland in Dongting Lake Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 536–543

[6] 杨长琴, 刘瑞显, 杨富强, 等. 种植密度对麦后直播棉产量与品质形成的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1221–1227
Yang C Q, Liu R X, Yang F Q, et al. Effects of planting density on yield and fiber quality of direct-seeded cotton after barley[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, 29(6): 1221–1227

[7] 杨长琴, 刘瑞显, 杨富强. 长江下游棉区适宜麦后直播棉品种筛选[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(8): 81–83
Yang C Q, Liu R X, Yang F Q. Suitable cultivar selection of direct seeding cotton after wheat harvest in lower vallelly of Yangzi River[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 81–83

[8] 张国伟, 杨长琴, 倪万潮, 等. 施氮量对麦后直播棉氮素吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 157–164
Zhang G W, Yang C Q, Ni W C, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen uptake and utilization of direct-seeded cotton after wheat harvest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 157–164

[9] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 等. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3631–3640
Xue X P, Wang J G, Guo W Q, et al. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3631–3640

[10] 勾玲, 闫洁, 韩春丽, 等. 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 488–493
Gou L, Yan J, Han C L, et al. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 488–493

[11] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 氮肥分施比例对黄河滩地棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1092–1101
Ma Z B, Yan G T, Liu G Z, et al. Effects of split nitrogen fertilization on physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1092–1101

[12] 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 稳定氮肥用量对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 323–327
Li M, Ye S Y, Liu F, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(4): 323–327

[13] 侯秀玲, 张炎, 王晓静, 等. 新疆超高密度棉田氮肥运筹对产量和氮肥利用的影响[J]. 棉花学报, 2006, 18(5): 273–278

Hou X L, Zhang Y, Wang X J, et al. Effect of different nitrogen fertilization on yield and nitrogen using of super high-density cotton system[J]. Cotton Science, 2006, 18(5): 273–278
[14] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122–130
Li P C, Dong H L, Liu A Z, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 122–130
[15] Francisco E, Hoogerheide H. Nutrient management for high yield cotton in Brazil[J]. Better Crops with Plant Food, 2013, 97(2): 15–17
[16] Kakar N U, Tunio S, Chachar Q I, et al. Effect of different nitrogen application strategy for improved cotton varieties[J]. Sarhad Journal of Agriculture, 2012, 28(4): 531–538
[17] 沙安勤, 王宝银, 李炳维, 等. 里下河地区棉花超高产密肥优化调控研究[J]. 中国棉花, 2000, 27(12): 8–10
Sha A Q, Wang B Y, Li B W, et al. Effect of optimal density and fertilizer on super high yield of cotton in the lower river area[J]. China Cotton, 2000, 27(12): 8–10
[18] 王子胜, 徐敏, 刘瑞显, 等. 施氮量对不同熟期棉花品种的生物量和氮素累积的影响[J]. 棉花学报, 2011, 23(6): 537–544
Wang Z S, Xu M, Liu R X, et al. Effects of nitrogen rates on biomass and nitrogen accumulation of cotton with different varieties in growth duration[J]. Cotton Science, 2011, 23(6): 537–544
[19] 杨长琴, 刘敬然, 张国伟, 等. 花铃期干旱和渍水对棉铃碳水化合物含量的影响及其与棉铃生物量累积的关系[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2251–2258
Yang C Q, Liu J R, Zhang G W, et al. Effects of drought and waterlogging on carbohydrate contents of cotton boll and its relationship with boll biomass accumulation at the flowering and bolling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2251–2258
[20] 胡国智, 张炎, 李青军, 等. 氮肥运筹对棉花干物质积累、氮素吸收利用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 397–403
Hu G Z, Zhang Y, Li Q J, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter accumulation, N uptake and utilization and yield in cotton[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 397–403
[21] Peng S B, Khush G S, Virk P, et al. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential[J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 32–38
[22] Rochester I J, Peoples M B, Hulugalle N R, et al. Using legumes to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems[J]. Field Crops Research, 2001, 70(1): 27–41
[23] Boquet D J, Breitenbeck G A, Coco A B, et al. Fertilizer nitrogen rates to optimize cotton yield and fiber quality[J]. Louisiana Agriculture, 1991, 35: 10–11